

氏 名	後藤 裕
学 位 の 種 類	博士 (工学)
学 位 記 番 号	博甲第945号
学位授与の日付	平成19年9月28日
学位授与の要件	課程博士(学位規則第4条第1項)
学位授与の題目	平板・複合構造における応力の測定および解析理論に関する研究
論文審査委員 (主査)	廣瀬 幸雄 (自然科学研究科・特任教授)
論文審査委員 (副査)	山越 憲一 (自然科学研究科・教授), 佐々木 敏彦 (教育学部・教授), 北川 和夫 (自然科学研究科・教授), 安達 正明 (自然科学研究科・教授)

Abstract

In this thesis, the author studies the evaluation for composite materials deposited PVD thin films using X-ray diffraction technique and formulates refined theory, the mixed assumption theory of elastic plates.

In the first chapter, composite materials increases to use in various fields and when they are used as a structure material, describes as the subject of mechanics analysis and the background of this study.

In the second chapter, the applicable X-ray stress measurement method to the textured materials is described on the assumption that the information about each crystallite orientation was defined by the crystallite orientation distribution function (ODF).

In the third chapter, TiCN thin film is evaluated as composite materials model. The existence of rather strong compressive residual stress about -5GPa was clarified, and there is little remarkable change in the stresses by the difference of the bias voltage and then TiCN thin film made by the bias voltage 120V had the most strong {111} fiber texture of all specimens.

In the forth chapter, it is proposed a refined theory considering to shear deformation and thickness normal stress of plate and give an account of the modification of Reissner's and Mindlin's plate theory and then dynamic analyses of anisotropic circular plate including the effect of shear deformation.

In the fifth chapter, it is formulated general higher- order theory of plate under assumption of displacement and stress components of the plate thickness distribution by using the dynamic variation principle of the mixing type which made specialized the basis of Hu-Washizu and this equation is examined through static and dynamic solution example.

In the last chapter, contents described from second chapter to fifth chapter are summarized.

学位論文概要

近年、複合材料の発展はめざましく、複合化の方法も多様化する中で、機械、土木、建築など様々な分野で使用が増大しつつある。このような複合材料を構造材として用いるとき、その使用時における力学特性が材料強度の観点から非常に重要となる。理想化された視点では平均場を想定して力学解析が可能であるが、より実際の材料により即した解析を行うためには、実験による測定や理論の高度化が必要になる。例えば、複合材料において、平板が非常に薄い場合、連続体としての取り扱いが難しくなる。逆に、平板の厚みを考慮すべき場合、従来の古典理論よりせん断変形の考慮さらには変位成分と応力成分も考慮した理論による解析が望ましい。

本研究では、これらの問題に対し、複合構造の力学的性質を考えるモデルとして平板薄膜の実験による応力解析ならびに平板理論の修正・統一化、新たな解析理論の提案を行った。

具体的には、PVDにより蒸着されたセラミック硬質膜を有する複合材料について、残留応力についての考察を行うとともに、薄膜材の結晶配向についての評価もあわせて行った。次に、薄膜材料そのもののような極異方性材料に着目して、矩形板、円形板の問題について理論式の簡明さを失わないように注意して定式化を行った。さらに、変位と応力を同時に仮定した混合仮定型の理論を提案し、一般高次平板理論を目指した。得られた知見をまとめると次のとおりとなる。

第1章では、本研究に関する背景と目的および構成について記述した。

第2章では、異方性結晶状態を持つ薄膜材料に適用されるX線応力測定法について、結晶方位分布関数（ODF）を用いて弾性異方性を考慮する測定方法の原理について記述した。

第3章では、TiCN 薄膜を有する複合材料をモデルとして、異方性度合いの評価と応力値への影響について前章の方法で応力を測定し考察を行った。TiCN 薄膜には約 -5GPa と非常に強い圧縮残留応力を持つが、バイアス電圧の違いで応力の値に顕著な変化がないことやTiCN 薄膜の結晶配向性はバイアス電圧が 120V の時に最も強い $\{111\}$ 面の集合組織を持つことが明らかになった。

第4章では、弾性平板理論の理解の煩雑さを避け基礎的理論の整合を試みるため、最も代表的なReissner理論とMindlin理論に対して修正および統一を行った後に、円形板の動的解析理論を定式化した。具体的には、従来Mindlin理論で無視されてきた板厚方向直応力 σ_z の影響を考慮することによって修正理

論を誘導・定式化し、支配方程式で静的な場合に限れば、断面力を算定する段階までは Reissner 理論に一致し、動的な問題で慣性力の項を無視すれば Mindlin 理論と完全に一致することを確認した。また、その理論およびせん断変形理論で代表的な Ambartsmyan 理論を取り上げて、極異方性を示す円形板の動的解析の理論式についても定式化した。

第 5 章では、Hu-Washizu の原理を特殊化した混合型の動的変分原理を用い、面外応力成分と変位成分の板厚方向分布を仮定する一般化高次平板理論を構築し、静的・動的解析例を通じて、厳密解との比較により精度を検討した。提案した理論は、面外応力と変位成分を独立未知量とする考え方によって、境界条件の問題に柔軟に対応でき、混合仮定であるために生ずる理論の従属変数の増加もある程度抑えられる点等を考慮すると、効率の良いものである。解析例から、2 次理論でかなり満足のいく精度が得られ、3 次理論ではほぼ厳密解に一致した値となることがわかった。動的問題の解析結果でも、厳密解との比較で広い範囲で良好な精度を与えることを確認できた。

第 6 章では、本研究全体として得られた知見を総括した。

以上の検討により、薄膜を有する複合材料の実験力学的応力解析法の適用と異方性度合いの評価をし、応力仮定型と変位仮定型、混合仮定型について弾性平板理論の定式化を行った。本研究の知見が、今後、工学分野における平板・複合構造の応力解析に大きく役立つことを期待したい。

学位論文審査結果の要旨

平成 19 年 8 月 1 日に第 1 回学位論文審査委員会を開催し、提出された学位論文及び関係資料に基づき論文内容を詳細に検討した。さらに、平成 19 年 8 月 1 日に行われた口頭発表後に、第 2 回学位論文審査委員会を開き、協議の結果、以下のように判定した。

本論文は構造材料において一般的かつ力学的なモデルを仮定し、平板および複合構造における応力解析モデルの提案と数値解析による検証、ならびに実験力学的解析方法について検討を行ったものである。本研究ではまず実験力学的手法として X 線応力測定法を選び、弾性異方性を考慮した応力測定解析法を実際の異方性薄膜平板材料に適用し、その解析法の妥当性について非常に有用であることを確認した。次いでより一般的な力学的解析法の定式化に向けた研究を行った。中等厚の平板理論で代表的な Reissner 理論と Mindlin 理論を取り上げ、両理論の相違点となっている時間項およびせん断応力について考慮した修正理論を導出し、この新たな統一理論の精度を比較検証した。さらに一般的な理論構築を目指して、Hu-Washizu の原理を特殊化した動的変分原理を用いて一般化高次平板理論を構築した。厳密解との比較によりその精度検討し、結果この構築理論は境界条件の問題にも柔軟に対応でき計算効率のよいものであると考えられる。以上の実験および理論的力学解析法の定式化は、平板・複合構造の力学的理解に大きく貢献するものと確信する。以上、本論文は、博士（工学）の学位論文に値するものと判定する。